

---

УДК 621.762.4

Канд. техн. наук М. І. Носенко, д-р техн. наук В. О. Павлов  
Національний технічний університет, м. Запоріжжя

## РОЗРОБКА СПОСОБІВ ГАРЯЧОЇ ДЕФОРМАЦІЇ ПОРОШКОВИХ ЗАГОТОВОК ПРИ ОТРИМАННІ ДЕТАЛЕЙ КОНСТРУКЦІЙНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ

*Розроблено схеми та способи отримання порошкових виробів у процесі гарячої деформації.*

**Ключові слова:** гаряча деформація, порошкова заготовка, щільність, очаг деформації, деформований об'єм.

Методи порошкової металургії є одним із перспективних напрямів у галузі виробництва конструктивних матеріалів та виробів із заданим рівнем механічних та експлуатаційних властивостей. Прогнозування параметрів технологічних процесів, вибір відповідних схеми та способу формування для отримання порошкових деталей із заданим рівнем щільності та механічних властивостей є важливою науковою та практичною проблемою.

Метою роботи є дослідження та розробка способів гарячого штампування порошкових заготовок при виготовленні деталей конструкційного призначення.

Використання компенсаційних щілин при штампуванні з елементами витікання дозволяє створити додаткові очагами деформації, що збільшує деформований об'єм металу у виробі та суттєво впливає на рівномірність розподілу щільності. Визначення коефіцієнта витікання  $K_{вит}$ , форми і розмірів додаткових очагів деформації, відносного деформованого об'єму металу при різних схемах штампування проводилось відповідно [1].

У результаті проведених досліджень розроблено спосіб отримання виробів із порошкових заготовок (а. с. № 1451984), який включає розміщення заготовки в

матриці та подальше гаряче штампування. Спосіб дозволяє забезпечити заданий розподіл щільності і механічних властивостей за об'ємом деталі. Для цього перед розміщенням заготовки в матриці розраховується форма, місцерозташування та об'єм додаткових очагів деформації за формулою (рис. 1):

$$V^* = \sum \sqrt{\frac{F}{\pi} \cdot \sqrt{K_{\text{вум}} - 2}} + \sum \left( \frac{3}{K_{\text{вум}}} + \frac{8\pi \cdot H^2}{3F \cdot K_{\text{вум}}^3} \right) - \sum V_i^* \quad (1)$$

де  $V^*$  – об'єм додаткових очагів деформації (рис. 2);  $n, m$  – число додаткових очагів деформації, які створюють у приторцевих зонах або за висотою перерізу заготовки відповідно;  $K_{\text{вум}1} \dots K_{\text{вум}i}$  – коефіцієнти витікання матеріалу заготовки;  $F$  – площа перерізу матриці;  $H$  – висота виробу;  $V_i^*$  – одиничний відносний об'єм перекриття додаткових очагів деформації.

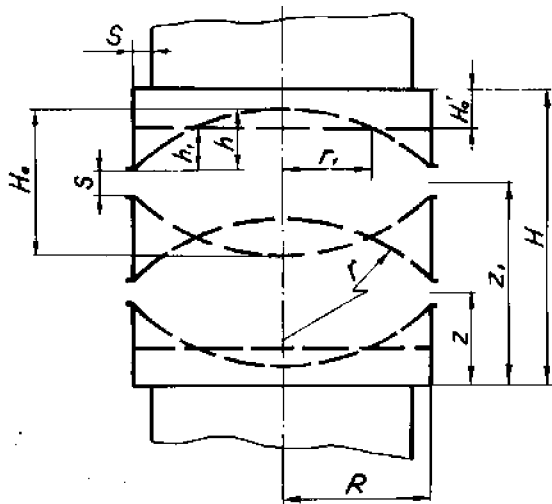


Рис. 1. Розрахункова схема для визначення деформованого об'єму металу

Число додаткових очагів деформації визначають за вказаною залежністю 1. При цьому перша складова визначає вибір додаткових очагів деформації в приторцевих зонах заготовки, які контактують з пуансонами. При необхідності отримання виробів із підвищеними механічними властивостями в приторцевих зонах компенсатори розташовують між матрицею 1 та пуансонами 2 і 3 (рис. 2, а). При необхідності підвищення властивостей тільки з одного торця компенсатори виконують тільки між матрицею 1 та одним з пуансонів, наприклад 2. Між матрицею та пуансоном 3 компенсатори в цьому випадку відсутні.

Друга складова виразу 1 визначає вибір додаткових очагів деформації за висотою заготовки. Компенсатори виконують в матриці на заданому за висотою рівні, де у виробі необхідно отримати підвищені механічні властивості (рис. 2, б).

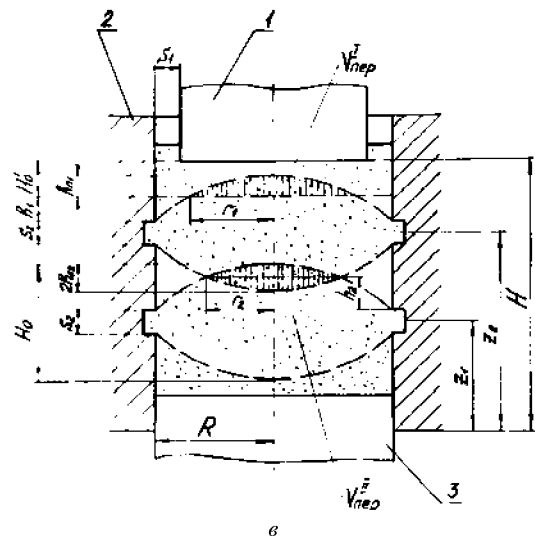
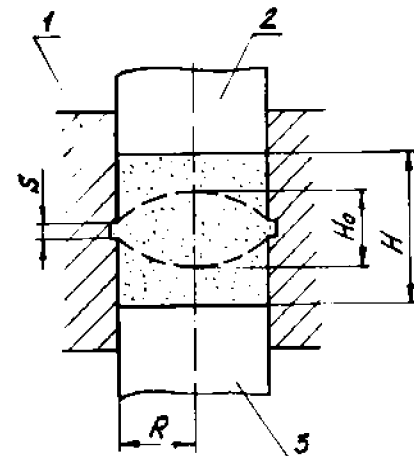
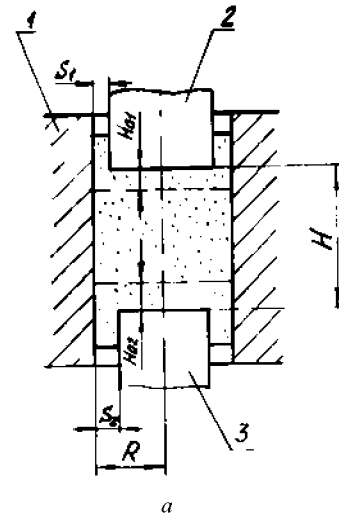


Рис. 2. Схеми штампування порошкових заготовок: а – матриця; б, в – пуансони

Третя складова визначає відносний об'єм перекриття додаткових очагів деформації, наявність яких дозволяє додатково підвищити механічні властивості виробів в заданих місцях. Додаткові очагами деформації створюють при виконанні компенсаторів у технологічному оснащенні.

Відносний об'єм очага деформації визначається як:

$$V^* = \frac{V_{o.d.}}{V_{vir}},$$

де  $V_{o.d.}$ ,  $V_{vir}$  – відповідно об'єм очага деформації та об'єм виробу.

Очаг деформації при схемі деформації на рис. 1, а має циліндричну форму, а його висота визначається як:

$$H'_o = \frac{\sqrt{\frac{F}{\pi}} \cdot \sqrt{K_{eum} - 2}}{K_{eum}}, \quad (3)$$

При схемі деформації на рис. 1, б очаг деформації має сферичну форму, а його висота визначається як:

$$H_o = \frac{5H}{K_{eum}}, \quad (4)$$

де  $F$  – площа перерізу матриці;  $H$  – висота виробу;  $K_{eum} = \frac{B}{S}$  – коефіцієнт витікання;  $B$  – характерний розмір виробу (при схемі деформації на рис. 2, а,  $B = 2R$ ; при схемі деформації на рис. 2, б,  $B = H$ );  $R$  – радіус матриці;  $S$  – висота компенсаційної щілини.

Відносний об'єм очага деформації для схеми на рис. 2, а визначається як:

$$V^* = \frac{\pi R^2 \cdot H'_o}{\pi R^2 \cdot H} = \frac{\sqrt{\frac{F}{\pi}} \cdot \sqrt{K_{eum} - 2}}{H \cdot K_{eum}}. \quad (5)$$

Звідки при наявності двох очагів деформації (рис. 2, а) їх сумарний відносний об'єм визначається як:

$$V^* = \sum_i^n \frac{\sqrt{\frac{F}{\pi}} \cdot \sqrt{K_{eum} - 2}}{H \cdot K_{eum}}. \quad (6)$$

Об'єм очага деформації для схеми на рис. 2, б визначається як:

$$V_{o.d.} = 2V_c + V_k, \quad (7)$$

де  $V_c$  – об'єм сегмента кулі;  $V_k$  – об'єм циліндра висотою  $S$ .

При визначенні об'єму частин кулі використовуються відомі співвідношення [2]:

$$V_k = \pi R^2 S = \pi R^2 \cdot \frac{H}{K_{eum}}; \quad (8)$$

$$2V_c = \frac{1}{3} \pi h (3R^2 + h^2), \quad (9)$$

$$\text{де } h = \frac{H_o - S}{2} = \frac{2H}{K_{eum}};$$

$$V_{o.d.} = \frac{\pi H (8H^2 + 9K_{eum}^2 \cdot R^2)}{3K_{eum}^3}; \quad (10)$$

$$V^* = \frac{\pi H (8H^2 + 9K_{eum}^2 \cdot R^2)}{3K_{eum}^3 \cdot \pi R^2 H} = \frac{3}{K_{eum}} + \frac{8H^2 \cdot \pi}{3F \cdot K_{eum}^3}. \quad (11)$$

При схемі деформації на рис. 2, в, для визначення  $V^*$  необхідно враховувати сумарний відносний об'єм перекриття

$$\sum V_i^* = \frac{V_{nep}^I + V_{nep}^{II}}{\pi \cdot R^2 \cdot H}. \quad (12)$$

$V_{nep}^I$  визначається, як об'єм сегменту кулі

$$V_{nep}^I = \frac{1}{6} \pi h_{n1} \cdot (3r_1^2 + h_{n1}^2); \quad (13)$$

$$r_1^2 = R^2 - h_1^2 - 2h_1 \cdot \sqrt{r^2 - R^2}; \quad (14)$$

$$r = \frac{R^2 + h^2}{2h} = \left( h = \frac{2H}{K_{eum}} \right) = \frac{R^2 \cdot K_{eum}^2 + 4H^2}{4HK_{eum}}, \quad (15)$$

де  $r$  – радіус сферичної поверхні,

$$r_1^2 = R^2 - h_1^2 - 2h_1 \cdot \frac{R^2 \cdot K_{eum2}^2 - 4H^2}{4H \cdot K_{eum2}}. \quad (16)$$

$V_{nep}^{II}$  визначається аналогічно  $V_{nep}^I$ , як здвоєний об'єм сегмента кулі

$$V_{nep}^{II} = \frac{1}{3} \pi \cdot h_{n2} \cdot (3r_2^2 + h_{n2}^2). \quad (17)$$

Приклад 1.

Для отримання порошкової титанової втулки (рис. 3) з розмірами  $2R = 32$  мм,  $2R_1 = 23$  мм,  $H = 20$  мм,  $h = 5$  мм з ударною в'язкістю не нижчою від 1100 кДж/м<sup>2</sup> заготовка із ПТЕС-1 з відносною щільністю 90 % нагрівається до 900 °С в середовищі аргону і розміщується в матриці 1. До заготовки прикладається двосторонній тиск пуансонами 2 і 3. Коефіцієнт витікання визначається за формулою:

$$K_{\text{вум}} = \frac{2R}{S} = 7,1,$$

де  $R$ ,  $S$  – відповідно радіус та товщина стінки втулки. Висота очага деформації (див. формулу 3)

$$H_o = 5,09 \text{ мм.}$$

Відносний об'єм очага деформації (див. формули 2 і 5)

$$V^* = \frac{R^3 \cdot \sqrt{K_{\text{вум}} - 2}}{(R^2 \cdot H - R_1^2 \cdot h) \cdot K_{\text{вум}}} = 0,415.$$

В результаті процесу штампування з витіканням матеріалу отримано виріб (втулку) з відносною щільністю  $\theta \geq 99,5\%$  із заданим рівнем ударної в'язкості.

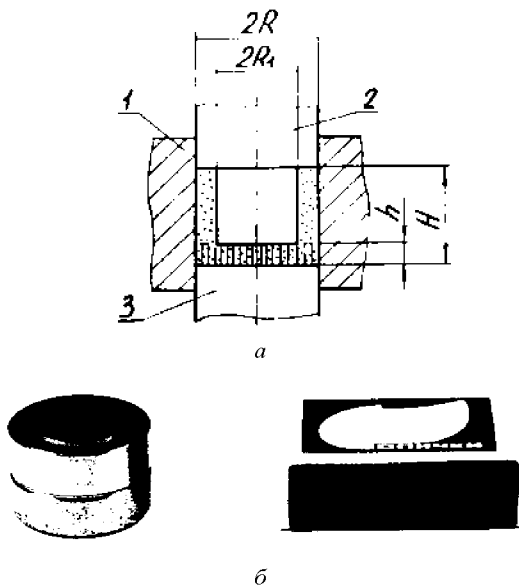


Рис. 3. Схема штампування втулки (а) та готовий виріб (б)

Приклад 2.

Для отримання порошкового титанового ролика (рис. 4) діаметром  $2R = 61$  мм, висотою  $H = 10$  мм з двома кільцевими впадинами розмірами  $h = 2,5$  мм;  $2R_1 = 40$  мм;  $2R_2 = 28$  мм з ударною в'язкістю не нижчою від  $1200 \text{ кДж/м}^2$  заготовка із ПТЕС-1 з відносною щільністю  $90\%$  нагрівається до  $900 \text{ }^\circ\text{C}$  в середовищі аргону і розміщується в матриці 1. До заготовки прикладається тиск пуансоном 2. Коефіцієнт витікання визначається за формулою:

$$K_{\text{вум}} = \frac{H}{S} = 10,$$

де  $H$ ,  $S$  – відповідно висота ролика та висота компенсаційної щілини.

Висота очага деформації (див. формулу 4)

$$H_o = 5 \text{ мм.}$$

Відносний об'єм очага деформації (див. формули 2 і 11)

$$V^* = \frac{H \cdot (8H^2 + 9K_{\text{вум}}^2 \cdot R^2)}{3K_{\text{вум}}^3 \cdot [R^2 H - 2h \cdot (R_1^2 - R_2^2)]} = 0,395.$$

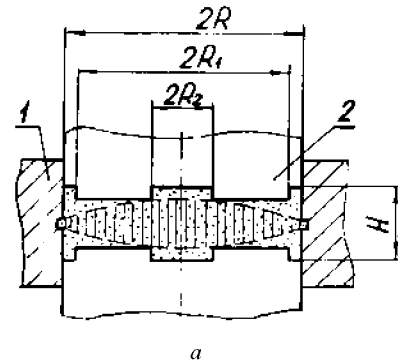


Рис. 4. Схема штампування ролика (а) та готовий виріб (б)

У результаті процесу штампування з витіканням матеріалу отримано виріб (ролик) з відносною щільністю  $\theta \geq 99,8\%$  із заданим рівнем ударної в'язкості.

Приклад 3.

Для отримання порошкової титанової кришки (рис. 5) діаметром  $2R = 114$  мм, висотою  $H = 27$  мм з кільцевою впадиною розмірами  $h = 6$  мм;  $R_1 = 98$  мм;  $R_2 = 38$  мм з ударною в'язкістю не нижчою за  $1300 \text{ кДж/м}^2$  заготовка із ПТЕС-1 з відносною щільністю  $90\%$  нагрівається до  $900 \text{ }^\circ\text{C}$  в середовищі аргону і розміщується в матриці 1. До заготовки прикладається тиск пуансоном 2. Коефіцієнт витікання матеріалу в компенсаційну щілину між пуансоном і матрицею визначається за формулою:

$$K_{\text{вум}} = \frac{2R}{S_1} = 14,25,$$

де  $R$ ,  $S$  – відповідно радіус і товщина стінки кришки.

Висота очага деформації (див. формулу 3)

$$H'_o = 14 \text{ мм.}$$

Коефіцієнт витікання матеріалу в компенсаційну щілину за висотою порожнини матриці ( $z = 5$ ) мм визначається як:

$$K_{\text{вум}2} = \frac{H}{S_2} = 13,5 \text{ мм},$$

де  $H$ ,  $S_2$  – відповідно висота кришки і компенсаційної щілини.

Висота очага деформації (див. формулу 4)

$$H_o = 10 \text{ мм.}$$

Відносний об'єм очага деформації (див. формулу 1)

$$V^* = \frac{R^3 \cdot \sqrt{K_{\text{вум}1} - 2}}{[R^2 H - h \cdot (R_1^2 - R_2^2)] \cdot K_{\text{вум}1}} + \frac{H \cdot (8H^2 + 9K_{\text{вум}2}^2 \cdot R^2)}{3R_{\text{вум}2}^3 \cdot [R^2 H - h \cdot (R_1^2 - R_2^2)]} - V_i^* = 0,603 + 0,259 - V_i^*,$$

де  $V_i^*$  – відносний об'єм перекриття додаткових очагів деформації

$$V_i^* = \frac{V_{\text{пер}}}{V_{\text{вир}}},$$

де  $V_{\text{пер}}$ ,  $V_{\text{вир}}$  – відповідно об'єм перекриття додаткових очагів деформації та об'єм виробу.

Відповідно формули 14

$$V_{\text{пер}} = \frac{1}{6} \pi \cdot h_n \cdot (3r_1^2 + h_n^2).$$

Звідки

$$V_i^* = \frac{h_n \cdot (3r_1^2 + h_n^2)}{6 \cdot [R^2 H - h \cdot (R_1^2 - R_2^2)]} = 0,049.$$

Висота перекриття очагів деформації визначається, як:

$$h_n = H_o - (H - h - H') = 3 \text{ мм.}$$

Відповідно до формули 17

$$r_1^2 = R^2 - h_1^2 - 2h_1 \cdot \frac{R^2 \cdot K_{\text{вум}2}^2 - 4H}{4H \cdot K_{\text{вум}2}} = 2439,75 \text{ мм}^2,$$

$$\text{де } h_1 = H_o - h_n - z - \frac{S}{2} = 1 \text{ мм.}$$

Підсумково отримуємо:

$$V^* = 0,603 + 0,259 - 0,049 = 0,813.$$

У результаті процесу штампування з витіканням матеріалу отримуємо виріб (кришку) з відносною щільністю  $\theta \geq 99,8\%$  та заданим рівнем ударної в'язкості.

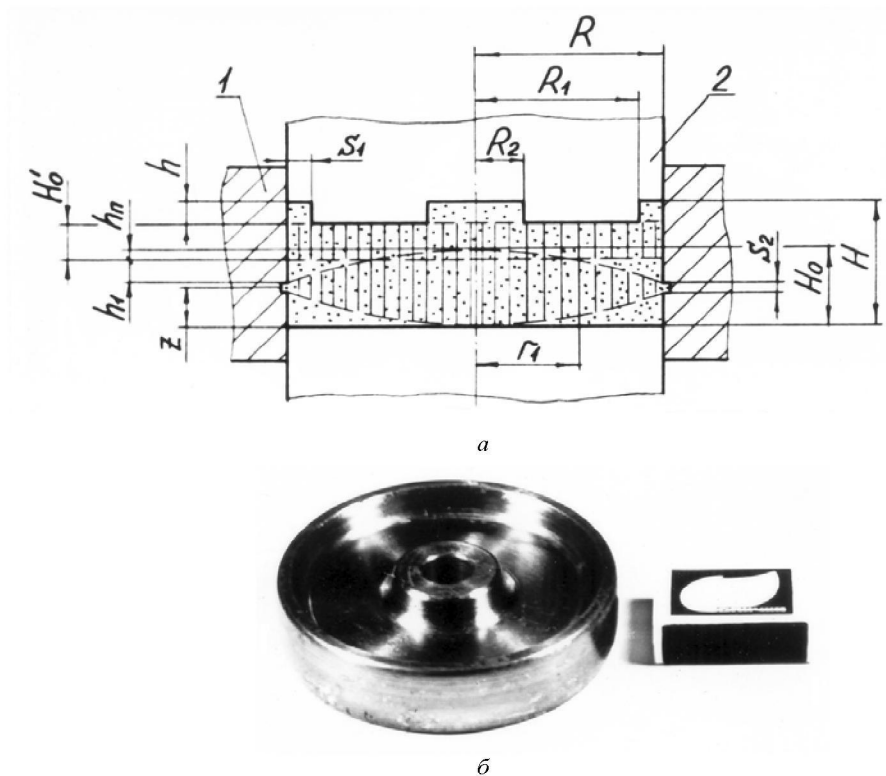


Рис. 5. Схема штампування кришки (а) та готовий виріб (б)

З метою зменшення витрат металу розроблено спосіб виготовлення виробів з порошкових заготовок (а. с. № 1360004), який включає нагрівання заготовок та гарячу деформацію, що проводиться з витіканням матеріалу заготовки у бокові порожнини матриці. Потім матеріал у порожнинах допресовується та відокремлюється від основного виробу. Спосіб забезпечує можливість одночасного отримання за один цикл пресування декількох деталей, наприклад, заготовок болта та шайби, і дозволяє практично виключити втрати металу.

Приклад 4.

Нагріта до 95 °С заготовка 1 із електролітичного порошка титану ПТЕС-1 з відносною щільністю 90 % розміщується в складальній матриці 2, в якій є кільцева порожнина 3 (рис. 6, а). При гарячій деформації під дією ступінчастого пуансона 4 матеріал заготовки витікає в порожнину 3 (рис. 6, б). Після формування виробу в матриці 2 пуансон 4 діє верхнім ступенем на верхню секцію матриці. Відбувається допресовка матеріалу в порожнині 3. Потім пуансоном 5 матеріал в порожнині 3 відокремлюється від основного виробу (рис. 6, в). У результаті за рахунок забезпечення витікання матеріалу в режимі гарячої деформації, основний виріб – болт, який формується в матриці, має відносну щільність  $\geq 99,8\%$ , а виріб, що формується в боковій порожнині; шайба – 98,4 %.

У процесі формування за один цикл заготовок під болт та під шайбу практично виключаються втрати металу. Крім того, забезпечуються високі механічні властивості основного виробу ( $\sigma_B = 400 - 420$  МПа;  $\delta = 30 - 32\%$ ;  $\psi = 40 - 44\%$ ;  $KCU = 1100 - 1200$  кДЖ/м<sup>2</sup>).

Отже, в результаті проведених досліджень розроблено способи гарячої деформації пористих порошкових заготовок, які забезпечують створення додаткових очагів деформації в зонах, де сконцентрована залишкова пористість, дозволяють збільшити деформований об'єм та рівномірність розподілу щільності у виробі і отримувати одночасно один цикл пресування декількох деталей.

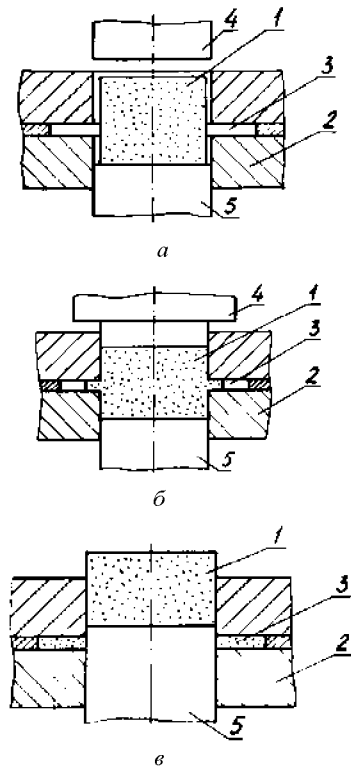


Рис. 6. Схема штампування порошкових заготовок: а – завантаження заготовки в матрицю; б – гаряча деформація заготовки; в – відокремлення матеріалу в бокових порожнинах матриці від основного виробу

#### Список літератури

1. Носенко М. І. Дослідження гарячого штампування порошкових заготовок/Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні / М. І. Носенко, В. О. Павлов. – 2006. – № 2. – С. 51–56.
2. Выгодский М. Я. Справочник по элементарной математике / М. Я. Выгодский– М. : Наука, 1978. – 335 с.

Одержано 06.06.2013

**Носенко М.И., Павлов В.А. Разработка способов горячей деформации порошковых заготовок при получении деталей конструкционного назначения**

*Разработаны схемы и способы получения порошковых изделий в процессе горячей деформации.*

**Ключевые слова:** горячая деформация, порошковая заготовка, плотность, очаг деформации, деформированный объем.

**Nosenko M., Pavlov V. Development of methods for hot deformation powder billets in obtaining parts for constructional purposes**

*The schemes and methods for producing of powder products during hot deformation were developed.*

**Key words:** hot deformation, powder billet, density, deformation zone, deformed volume.